

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 23320061152625

UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

基于 FH-MFSK 水声通信系统平台的设计与实现

Underwater Acoustic Communication System Based on  
FH-MFSK

朱晓明

指导教师姓名: 程 恩 教 授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2010 年 月

论文答辩时间: 2010 年 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2010 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘要

水声通信技术是当代海洋资源开发和国家安全保障的重要组成部分，也是我国海洋高技术急待研究开发的项目之一。随着现代海洋资源开发的迅猛发展和国家海洋安全的迫切需求，水声通信技术的研究越来越受到人们的重视。但是水声信道是一个十分复杂的时空频变随机多径信道，强多径效应和大幅度起伏是造成水声通信性能较差的主要因素，它会导致信号幅度衰落和严重的码间干扰。跳频通信是扩展频谱通信的一种重要方式，其具有的抗干扰能力强，特别是抗窄带干扰、抗噪声、抗多途；以及保密性和易于实现码分多址等特点使得跳频通信在复杂浅海水声通信中受到广泛重视。

本文针对水声信道的特点，研究了一种传输数据率可变水声跳频通信系统。当信道条件较差、通信距离远的时候，选择较低的通信数据率，提高通信可靠性；但是当信道环境较好、通信距离较短的时则可以选择较高的数据传输速率，以提高传输效率，减小系统开销。

论文首先分析了浅海水声信道的特性，建立了水声信道模型；阐述了扩频通信尤其是跳频通信的基本原理，分析水声跳频通信中的同步技术和信号检测方法；在此基础上，利用Matlab建立了基于MFSK的水声跳频通信系统仿真平台，仿真中的调制方式、数据传输率和信道的环境参数都可以进行调节，由此考察了不同水声信道环境对各种MFSK调制方式下、数据传输率性能的影响，最后通过以LAB-8901为基础的试验平台对水声跳频通信系统进行了实验室水池测试，结果表明，该水声跳频通信系统可以在不同距离、不同信道环境下选取相应的传输速率提高系统的效率。

关键词：水声通信；跳频；MFSK

## Abstract

Underwater acoustic communication (UAC) Technology plays an important role in marine resource exploitation and national security etc. With the rapid development of marine resource exploitation and urgent demand of National Ocean security, UAC Technology has been paid more and more attention. However, underwater acoustic (UWA) channel is expressed as a complex channel which is randomly variable in time-space-frequency, Strong multi-path effect and large amplitude fluctuation is the main factor that it will lead to signal fading and severe inter-symbol interference (ISI). Frequency-hopping communication as a major method of Spread-spectrum communication has many advantages, for example, anti-jamming ability, in particular the ability to narrow-band interference, anti-noise, anti-multipath, confidential and easy to implement Code Division Multiple Access (CDMA) technique. Consequently, shallow water acoustic frequency-hopping communication deserved extensive attention.

The paper focuses on a underwater frequency-hopping communication system with variable data transmission rates based on the characters of UWA channels. When the condition of the channel is poor and the communication distance is long, low data transmission rate can be chosen to enhance the reliability of communication, otherwise, high transmission rate will be selected to improve transmission efficiency and reduce overhead.

Firstly, the paper analyzes the characteristic of shallow water acoustic channel, and creates the UWA channel model; it describes the basic principle of spread spectrum communication especially FH communication, synchronization techniques and signal detection methods in UWA FH communication; based on the theory, Matlab is applied to establish a simulating platform for a multi-standard communication system. In this platform, the modulation mode, the data transmission rate and the environmental parameters of the channel are all adjustable. In that way, the effects on data transmission rate in different modulation modes are studied.

Finally, a laboratory research in the pool is implemented to test the UWA FH communication system over a platform based on LAB-8901. According to the experimental results, in this system appropriate data transmission rate can be selected under different distance and channel environments to improve system efficiency.

**Key Words:** Underwater Acoustic Communication; Frequency Hopping; MFSK

## 目录

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 水声通信技术研究进展	2
1.2.1 国外水声通信研究进展	3
1.2.2 国内水声通信研究进展	6
1.3 论文主要内容	7
<b>第 2 章 浅海水声信道物理特性</b>	<b>8</b>
2.1 海洋声学特性	8
2.1.1 选择声波的原因	8
2.1.2 海洋环境噪声	8
2.2 浅海水声信道的主要特点	10
2.2.1 多径效应	10
2.2.2 多普勒频移	12
2.2.3 传输损耗	13
2.2.4 有限的频带	14
2.3 浅海水声信道模型	14
2.3.1 N 径确定性模型	15
<b>第 3 章 水声通信中的跳频技术</b>	<b>18</b>
3.1 扩展频谱通信	18
3.1.1 扩频技术的理论基础	18
3.1.2 实现扩频通信的几种方式	19
3.2 跳频通信系统	21
3.2.1 跳频系统的基本原理	21
3.2.2 跳频系统的数学模型	22
3.2.3 跳频通信系统中的主要参数	24

3.2.4 跳频通信系统的优点 .....	26
<b>第 4 章 水声跳频通信同步技术与信号检测 .....</b>	<b>28</b>
4.1 跳频系统同步概述.....	28
4.1.1 跳频同步技术 .....	28
4.1.2 水声跳频通信系统同步方案 .....	32
4.2 水声通信中的信号检测技术.....	33
<b>第 5 章 水声跳频通信系统仿真与实现 .....</b>	<b>37</b>
5.1 水声跳频系统组成.....	37
5.2 跳频仿真系统模型.....	38
5.2.1 调制与解调方式 .....	39
5.2.2 跳频图案设计 .....	41
5.2.3 同步方式的设计 .....	43
5.3 仿真系统的图形用户界面.....	44
5.4 仿真结果分析.....	47
5.5 系统的实现.....	53
5.5.1 系统总体设计方案 .....	53
5.5.2 发送部分 .....	54
5.5.3 接收部分 .....	55
5.5.4 试验结果分析 .....	57
<b>第 6 章 总结和展望.....</b>	<b>60</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>61</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>64</b>



## Contents

<b>Chapter 1 Preface.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research Background.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Research Progress .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Research Progress Abroad.....	3
1.2.2 Research Progress at Home .....	6
<b>1.3 Main Research Contents.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapter 2 Characteristics of Shallow-water Acoustic Channel....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Acoustic Characteristics of the Ocean.....</b>	<b>8</b>
2.1.1 The Reason for sound .....	8
2.1.2 Ambient Noise in the sea.....	8
<b>2.2 Main Features of Shallow Underwater Acoustic Channel .....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Multipath Effects .....	10
2.2.2 Doppler Shift .....	12
2.2.3 Transmission Lost.....	13
2.2.4 Limited bandwidth.....	14
<b>2.3 Shallow Underwater Acoustic Channel Model.....</b>	<b>14</b>
2.3.1 N-path Deterministic Model.....	15
<b>Chapter 3 FH Technology in Underwater Acoustic .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Spread Spectrum Communication System .....</b>	<b>18</b>
3.1.1 Theoretical basis of SS Communication .....	18
3.1.2 Typical ways of SS Communication .....	19
<b>3.2 Frequency-hopping Communication System.....</b>	<b>21</b>
3.2.1 Basic Principle of FH Communication.....	21
3.2.2 Mathematical Model of FH Communication.....	22
3.2.3 Technical Parameters of FH Communication .....	24
3.2.4 Technical Advantages of FH Communication .....	26

<b>Chapter 4 Synchronization and Signal Detection Technology in Underwater Acoustic FH Communication.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Synchronization Summary of FH Communication System .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 FH Synchronization Technology .....	28
4.1.2 Synchronization Technology Scheme in UAC FH Communication.....	32
<b>4.2 Detection Technology in Underwater Acoustic Communication.....</b>	<b>33</b>
<b>Chapter 5 Simulation and Realization of Underwater Acoustic FH Communication .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1 Composition of the FH System.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2 Mode of the FH Simulating System .....</b>	<b>38</b>
5.2.1 Modulation and Demodulation .....	39
5.2.2 Design of the Frequency Hopping Pattern .....	41
5.2.3 Design of the Synchronization Mode .....	43
<b>5.3 The GUI of the simulating system .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4 Analysing of the simulating results.....</b>	<b>47</b>
<b>5.5 Realization of system.....</b>	<b>53</b>
5.5.1 General Design of System .....	53
5.5.2 Transmitting Part .....	54
5.5.3 Receiving Part.....	55
5.5.4 Analysing of the Experimental Results .....	57
<b>Chapter 6 Summary and Forecast .....</b>	<b>60</b>
<b>References .....</b>	<b>61</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>64</b>

## 第1章 绪论

在地面和空中通信领域迅猛发展的同时,海底水下通信也引起了研究人员的关注。经过尝试,人们发现以往地面和空中的通信方式并不完全适用于水下通信。首先,有线方式的信息传输由于目标活动范围受限制、通信缆道的安装和维护费用高昂、对其它海洋活动可能存在影响等缺点,极大地限制了它在海洋环境中的应用;另外,由于在海水中,光波、电磁波的传播衰减都非常大,因而它们在海水中的传播距离十分有限,远不能满足人类海洋活动的需要。而声信号能在水中传播几十甚至几百公里的距离,因此采用声波作为信息传送的载体是目前海底实现中、远距离无线通信的唯一手段<sup>[1]</sup>。

### 1.1 选题背景及研究意义

海洋拥有丰富的资源和广阔的空间,在人类活动中占有越来越重要的地位。而海洋开发和海洋国防中的每一项活动,几乎都离不开通信和数据传输。与陆地上几乎完美的 Internet 网和移动通信网相比,海中通信所达到的性能还远远落后。而在浑浊、含盐的海水中,光波和电磁波的传播衰减都非常大,因而它们在海水中的传播距离十分有限,远不能满足人们对海洋中通信性能的需要。因此,采用在海水中衰减相对很小的声波作为信息传送的载体是目前实现中、远距离海水中无线通信的唯一手段<sup>[2]</sup>。

水声通信技术是近年来发展迅速、研究相当活跃的科学技术领域之一。水声信道是一个十分复杂的变参随机多径传输的信道,加上它的环境噪声高、带宽窄、可适用的载波频率低、传输的时延大等特点,这诸多不利因素加剧了抗多径干扰的困难。实现误码率低,数据率高的水声通信仍是很困难的技术。海上石油平台遥控指令、海底资源的勘探、海洋环境的监测、海上科学考察、水下航行器通信以及水下舰艇之间数据传输等都需要水下信息的可靠传输和交换<sup>[3]</sup>。

近年来,跳频通信被广泛用于水声通信领域,跳频通信作为扩频通信的一种重要方式,具有很强的抗多径干扰能力,能够很好地解决水声通信中的多径问题。此外,跳频通信系统还具有抗窄带干扰、抗噪声、易于组网、易兼容,以及

保密性和易于实现码分多址等特点,使得跳频通信在水声通信应用中受到极大的重视。2000 年,美国海军“Seaweb”计划中一项实验表明,海洋水声通信中跳频-移频键控(FH-FSK)方案比差分相移键控(DPSK)方案稳健得多<sup>[4]</sup>。

在不同的应用场合和不同的信道环境下,我们对于通信系统的传输速率都有不同的需求,例如水下无人航行器(UUV)与指挥舰船以及UUV之间的通信,其通信系统的环境复杂、距离多变。当信道条件较差、通信距离远的时候,我们当然只能选择最保守的通信数据率;但是当信道环境较好、通信距离较短的时候希望可以选择高一点的数据传输速率,以提高传输效率。若采用单一数据率传输模式,则通信系统受制于最大工作距离以及最恶劣信道而采用最保守的通信数据率,使水声通信的数据率较低。

为了避免单一数据率传输模式时,通信系统受制于最大工作距离以及最恶劣信道只能采用最保守的系统工作带宽、调制方式及数据率。本文尝试提供一套通信速率可变的水声跳频通信平台。即保证一定的误码率条件下,在信道条件好的时候,采用高速 MFSK 调制方式,节省系统的资源;信道条件劣化的时候,通过 2FSK 等牺牲传输速率换取性能提升。

## 1.2 水声通信技术研究进展

水声技术起初应用于军事领域。1914 年发明的水声电报系统是世界上第一个水声通信系统,也是水下无线数字通信系统的雏形,安装在英国海军巡洋舰上。1945 年由美国海军水声实验室研制的水下电话是世界上第一个水声语音通信系统,主要应用于美国海军潜艇通信。二战之后,军事和民用领域都对水声通信技术产生大量需求,水声通信技术开始迅速发展。最近20年,随着硬件技术的不断进步,特别是信号处理芯片计算能力的不断提高,使得水声通信技术有了实质的进步和稳定的发展,主要可以归纳为以下6个研究领域<sup>[2]</sup>,即水声信道物理特性、信道的仿真和测量;接收机结构的研制,主要是功能完善的信号处理机和算法的研究;用于衰落信道的各种分集技术的研究;编码技术,包括图像传输所需的压缩编码和能够提高系统可靠性的纠错编码技术的研究;水声数据通信网;新的高带宽效率的调制解调技术。

### 1.2.1 国外水声通信研究进展

从90年代以来,国外在水声数据高速率传输技术方面取得迅速的发展。在信号编码,信号处理方法等方面对水声数据通信进行很有价值的研究。

传统的水声通信调制方式是采用非相干的调制方式,以美国Woods Hole 海洋研究所为代表的一个例子是用载频20~30KHz,采用MFSK为调制信号,最大的传输速率达到5Kbit/s,在浅海水平信道工作的距离为4Km,系统的误码率为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 的数量级。

而目前利用相干检测方式进行水声信号处理已成为研究的焦点,大体上可以分成两类:一类是工作在非常短的距离,可用的频率带宽可达几百个KHz;而另一类是工作于深海大洋盆地系统,这时只有几百Hz的带宽和及其有限的功率。在相干监测领域,短距离信号起伏较低时,高速的数据传输已经进入实用的阶段。以日本研究的一种图像传输系统为代表:采用4-DPSK技术,载频为20 kHz,在海底到海面的6500m的垂直信道中,实现了16kbit/s的传输速率,在输入信噪比15dB时,系统的比特误码率为 $10^{-4}$ 数量级。同样的系统在浅海水平信道中,结合使用线性均衡器,工作在LMS算法下,也可达到同样的性能<sup>[5]</sup>。

英国伯明翰大学进行的浅海域视频图像传输研究,采用参量阵和DPSK方案,用40瓦的声功率传输16个灰度级的图像,工作距离2000米,误码率为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 数量级。

2000年5月底,美国海军成功地完成了在水下发送E-mail的实验,利用Benthos公司的ATM885型水声Modem(采用的信号处理器件为TI公司的DSP),实现了从水下400英尺的“海豚号”潜艇发出E-mail,经过附近的无线卫星中继浮标中转,成功通过Internet网络向位于圣地亚哥的美国海军总部发送了数个的Email信息<sup>[6]</sup>,首次实现了真正的海陆空三维移动通信。同时“海豚号”还可与其它水声Modem实现潜艇之间的双向通信。这标志着水声通信进入了实用化的阶段。

白俄罗斯近期研制成功了一种低速率远距离水声Modem,在几千瓦的发射功率下,传输距离可达100km以上,在2~10kHz带宽内利用伪随机编码、反卷积信道均衡实现潜艇间文字的传输,传输速率有6bit/s左右,其主要优点在于水平方向作用距离大、误码率低和隐蔽性高。法国几位科学家于2002年和2003年在

Brest Bay附近的多个海域进行了实时低速率水声语音通信的海试<sup>[7]</sup>，在500~4000m的水平距离上实现了6~20kbps的实时语音传输。

美国大西洋大学在2007年研制了一个单向的、高速率、高频率声学 Modem (HS-HFAM) 可以实时传输数据和图像，工作频率为260kHz和380kHz，采用BPSK和QPSK调制方式，传输速率为88768bit/s，并于2007年2月进行了海试，误码率为0.844%<sup>[8]</sup>。实物图如图1.1所示，其中左图是发送部分，右图是接收部分。



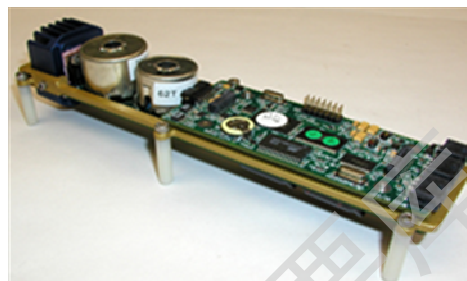
图 1.1 HS-HFAM 实物图

目前国外的通信设备正在往多制式的调制方式方向发展，如 Benthos 公司的水声通信设备及换能器 ATM885、ATM886、ATM887，调制方式为 MFSK 和 PSK 混合调制，其中 ATM885 和 ATM886 可以工作在2000米深度；ATM887可以工作在6000米的深度。工作频段为低频9~14kHz，中频16~21kHz可选，传输速率为140~15360bps；Benthos公司还推出了ATM891，UDB9000等水上控制单元，其中UDB9000的工作频段在7~15KHz，在PSK调制方式下的传输速率为2560~15,360 bps，在MFSK调制方式下的传输速率为140~2400 bps，可以同时连接100个水声Modem<sup>[9]</sup>。WHOI的Micro-Modem是一个小尺寸，低功耗声学Modem，系统工作在10、15、25KHz，带宽分别为4KHz支持FSK和PSK调制方式，传输速率是80~5000 bps<sup>[10]</sup>。英国Tritech公司的AM-300声学Modem采用的是扩频和QPSK调制方式，工作频段在8~16kHz，或者16~24kHz之间，其中采用扩频通信方式，传输速率为25~100bits/s，传输距离在4km~8km，采用QPSK调制方式传输速率为8000~16000bits/s，传输距离在2km~3km<sup>[11]</sup>。DSPComm公司的AquaComm水声Modem，调制方式采用直接扩频或者OFDM，传输速率为100或480 bps，宽带16KHz~30KHz，传输距离可以达到3km，带有误码检测的确认包发送。如果终点节点没有收到确认，重新发送2次，重发次数

是可以配置的<sup>[12]</sup>。LinkQuest 公司的水声 Modem 设备 UWM10000 等也是使用混合调制方式、声宽带扩频技术、抗多途影响的信道均衡技术和自动通信速率调整<sup>[13]</sup>。水声设备产品如图 1.2



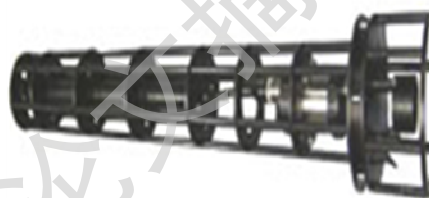
AQUAmodem



Micro-Modem



AquaComm-Modem



AM-300



UWM10000



ATM-885



ATM-886



ATM-887

图 1.2 水声通信产品

世界诸海洋强国正在开始研究利用水声 Modem 初步组建水下通信网络。比如：美国海军与 Benthos、Delphi Communications System Inc. 组建的 SeaWeb（海洋万维网），分别于 2000 年在麻省的 Buzzards Bay；2001 年的 San Diego；2002

年的 Hawii 进行了实验。该计划组建的水声网络主要将服务于军事,目前也有部分用于民用。欧盟(主要是英、法、荷兰、意大利等)实施海洋网络组建相关的计划名称有:ROBLONK, LOTUS, ACME 等。

### 1.2.2 国内水声通信研究进展

国内进行水声通信研究的高等院校和科研院所中国科学院声学所、哈尔滨工程大学、西北工业大学、厦门大学、中船重工总公司等,近年他们都取得了一些成果。

中科院声学所进行了声信号在浅海中传播问题的研究;海洋声信道自适应匹配实验研究;多途信道中卷积码的统计以及在理想负跃层浅海中脉冲波形的理论分析,并采用了信号设计、差错校正码和窄波束阵列三项技术,进行了水下通讯研究。在存在多途干扰的条件下,在100米水池实验获得较好的结果。他们采用QPSK调制,传输速率达到5 kbit/s,误码率为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ,工作距离为4公里。其设计的OFDM高速水声通信系统于2005年在南中国海进行了海洋水下试验,在水深小于100m,发射声源级195dB。试验系统采用了QAM、MPSK、DPSK等多种调制方式,传送多幅图像信息,其中采用16QAM调制的6.6km远接收解调后的图像,误码率为0,速率为20kbit/s<sup>[14]</sup>。

哈尔滨工程大学在信号编码上,设计了跳频、多频、多频与调相混合、自适应DCT压缩、矢量量化以及人工神经网络压缩。在解码上,采用自适应测频、高速谱分解、变换域自适应均衡等技术以及纠错码、精密图像同步、卷积码编码、维特比解码等技术,实现水平长距离传输。其采用了多频编码调制和快速谱分解码方式,在吉林松花湖进行了视频图象的水声传送试验,获得成功。哈工大还发展了PATTERN时延差编码技术,在松花湖水库进行水试,水深为40-60m,传输速率为350bit/s,误码率为 $10^{-4}$ ,作用距离比传统技术提高30%。该通讯体制在多途信道中是十分稳健的,通讯速率达300bit/s,平均误码率为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ,4M-PATTERNK时延差分编码通讯速率可以达到628~850 bit/s<sup>[15]</sup>。

西北工业大学在中远程水声通信方面也有较深入的研究,研究了M元LFM水声通信技术,并进行初步海试,带宽200Hz,水平距离30km,数据率为11.8bit/s



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库